

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Хорошилова Андрея Дмитриевича **«Анализ и разработка технологии ковшевой обработки сверхнизкоуглеродистых сталей с целью повышения качества поверхности автолистового проката»**, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2 (05.16.02) – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Диссертационная работа Хорошилова Андрея Дмитриевича посвящена проблеме совершенствования качества стали для кузовов автомобилей. Появление новых дизайнов, технологий и концепций проектирования определяют высокие требования к используемым материалам. Сегодня на смену традиционным сталям типа 08Ю пришли сверхнизкоуглеродистые IF-стали с чрезвычайно жесткими требованиями по содержанию вредных примесей. Производство этих сталей подразумевает проведение вакуумного обезуглероживания расплава, из-за чего на рафинирование от неметаллических включений (НВ) практически не остается времени. При недостаточном модифицировании кальцием это приводит к проблемам с разливаемостью стали и возникновению дефектов поверхности типа «Плена». С другой стороны, при чрезмерных добавках кальция, формирующиеся в большом количестве алюминаты кальция служат причиной появления надрывов уже при штамповке. Подобная комплексность проблемы обусловила **актуальность** настоящей работы.

### **Структура и основное содержание**

Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы и четырех приложений.

**В первой главе** автор подробно рассматривает особенности технологии производства IF-сталей конвертерным способом. Важным достоинством анализа является привлечение опыта таких мировых компаний, как Voestalpine, Nippon Steel и других. Описаны требования к качеству сталей, к содержанию в них вредных примесей, к которым относят серу, углерод, азот и кислород. Автор описывает распространённые приемы раскисления, отсечки печного шлака, наведения рафинировочного шлака, и многое другое. Рассмотрены разные варианты вакуумного обезуглераживания.

Отдельно описаны особенности формирования оксидных включений, их поведения в ковше и при непрерывной разливке, включая образование наростов на разливочных стаканах. Приведена классификация поверхностных дефектов проката из сверхнизкоуглеродистых сталей, способы их идентификации и методы предотвращения.

В конце главы автор формулирует цели и задачи исследования.

**Во второй главе** описаны материалы исследования, которыми служили готовый прокат стали 01ЮТ, а также образцы, отобранные по ходу сталеплавильного передела. Описаны использованные методики исследования, в частности методика подсчета количества включений с помощью оптического микроскопа; особенности интерпретации результатов РСМА; методы статистической обработки технологических параметров; методика термодинамических расчетов.

**Третья глава** посвящена исследованию природы дефектов «Плена». Для этого проведен анализ химического состава НВ, залегающих в дефектах. Полученные результаты позволили разработать ряд гипотез об их природе, а в дальнейшем проверить эти гипотезы с помощью регрессионного анализа. Разработана классификация дефектов по типу найденных включений: в 30% случаев найдены скопления оксидов алюминия, в 20% случаев обнаружены частицы шлакообразующей смеси с Ca, Si, F, Na, K, в 40% случаев обнаружены сочетания включений первого и второго типов.

Анализ технологических параметров позволил установить, что при разливке заготовок, из которых был получен холоднокатаный прокат с поверхностными дефектами типа «плен», наблюдались колебания уровня металла в кристаллизаторе. Таким образом, было показано, что для снижения отсортировки проката IF-сталей по дефектам поверхности требуется улучшить разливаемость стали и повысить чистоту по НВ.

**В четвертой главе** автором разработаны модели для управления внепечной обработкой IF-сталей. В первой части главы проанализированы реакции взаимодействия алюминия, кальция, кислорода и серы в расплаве. Используя сведения о константах реакций, а также воспользовавшись аппаратом параметров взаимодействия Вагнера, автор рассчитал необходимые остаточные концентрации кальция и алюминия для формирования жидких НВ. В расчетах учтена возможность образования сульфида кальция и получено, что для полного модифицирования НВ до жидкого состояния, при  $[Al] = 0,03\%$  необходимо поддерживать концентрацию кальция в металле на уровне 13–20 ppm, а при  $[Al] = 0,05\%$ , в диапазоне 18 – 38 ppm. Анализ активностей оксидов в системе  $Al_2O_3$ -CaO показал, что повышение содержания кальция в расплаве стали не приводит к существенному изменению состава жидких включений вплоть до предела растворимости кальция, и не приводит к получению твердых НВ. Установлена взаимосвязь расхода кальций-содержащих материалов и остаточных концентраций кальция в стали.

Термодинамический анализ шлаковых систем, проведенный по схожей методике, показал, что часть кальция из шлака может переходить в расплав, создавая область, обогащенную кальцием. Это позволило предложить оптимальный состав шлака, включая максимальное допустимое содержание закиси железа.

Для минимизации вредных с точки зрения загрязненности НВ операций подогрева стали после вакуумирования дугами, либо охлаждения, например, слябом, была разработана модель прогнозирования температуры стали при обработке на УВС.

В пятой главе представлены результаты промышленного опробования разработанной технологии. В опытных плавках изменен состав шлака и показано, что оптимальным является отношение  $(\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3)$  в диапазоне 1,2 – 1,4. Для модифицирования стали кальцием опробованы различные материалы, в том числе порошковые проволоки феррокальция ( $\text{FeCa30}$ ) и монолитного кальция. Все опытные плавки показали хорошую разливаемость. Анализ плавов со скорректированным составом шлака показал, что прокат от них на 38,6% менее дефектен, окисленность шлака снизилась с 5,8 до 1,7%, а загрязненность стали НВ по данным аттестационной пробы составила 0,0015% против 0,015% в стали, произведённой по базовой технологии.

В шестой главе оценена общая эффективность практического внедрения разработанной технологии производства ИГ-стали. Анализ массива из 58 плавов показал, что отсортировка холоднокатаного проката по дефекту плена составила всего 3%. Дефектность проката, оцененная с помощью системы автоматической идентификации дефектов в линии «Парситек» составила менее 2%. Сдаточные свойства проката остались на высоком уровне, а среднее значение показателя штампуемости возросло на 4%.

В Приложениях приведены примеры использованных паспортов плавов, результаты анализа составов включений в дефектах, ключевые параметры технологии, ответственные за образование дефектов, а также результаты статистической обработки данных по усвоению кальция.

К научной новизне диссертационной работы следует отнести следующие положения:

1. Предложен и подтвержден единый механизм попадания скоплений неметаллических включений, приводящих к образованию дефектов поверхности проката, в разливаемую заготовку, связанный с процессом нарастания эндогенных неметаллических включений на основе оксида алюминия на поверхности огнеупорной сталь-проводки и последующим их срывом в кристаллизатор.

2. Рассчитаны термодинамические условия модифицирования кальцием включений оксида алюминия до жидкого состояния.

3. Предложен механизм модифицирования включений оксида алюминия кальцием, находящимся в стали в равновесии с высокоосновным раскисленным шлаком.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработанная технология производства сверхнизкоуглеродистой стали внедрена в условиях ПАО «Северсталь», что позволило значительно увеличить выход годной продукции.

2. Предложенная автором модель для прогнозирования температуры стали в ковше позволила практически исключить случаи принудительной корректировки температуры расплава IF-стали перед отдачей на разливку.

3. Разработанный оптимальный состав рафинировочного шлака позволил отказаться от использования плавикового шпата и увеличить рафинирующие свойства шлака.

Наряду с несомненными достоинствами, по работе следует сделать следующие **замечания**:

1. Перечень выбранных методов исследования неметаллических включений явно недостаточен и не позволил полностью выявить особенности их морфологии и взаимного расположения. По сути, автор использовал только оптическую металлографию и РСМА единичных НВ.

2. Автор рассматривает образование включений в ковше при раскислении и модифицировании, но не учитывает эволюцию НВ по ходу затвердевания сляба.

3. При термодинамическом моделировании автор не учел параметр взаимодействия кальция по сере, величина которого сильно отрицательна, что отразилось бы на положении соответствующих равновесных изотерм. В этой связи вывод автора о том, что вплоть до концентрации серы в 0,008-0,010% при модифицировании кальцием возможно исключить образование его сульфида, сомнителен. Практический опыт показывает, что уже при концентрации серы в 0,005% доля сульфидов кальция в стали существенна.

4. Автор концентрируется в работе на технологии раскисления, модифицирования и наведения шлака. Однако существенным рычагом для повышения чистоты стали является технология очистительной продувки расплава аргоном.

5. Объем литературного обзора в 54 страницы явно слишком велик, и следовало бы более лаконично и емко описать только «узкие» места и явные пробелы в исследованиях, относящиеся непосредственно к работе.

6. В диссертации присутствует опечатки, повторы заголовков, неверные ссылки.

Указанные замечания не снижают общую высокую научную значимость работы.

В целом, диссертационная работа Андрея Дмитриевича Хорошилова выполнена на высоком современном научно-техническом уровне и представляет законченное исследование. Работа полностью соответствует отрасли технических наук, а именно специальности 2.6.2 - «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

Результаты работы изложены на 7 профильных конгрессах и конференциях, и опубликованы в 4 статьях из перечня, рекомендованного высшей аттестационной комиссией.

Считаю, что диссертационная работа «Анализ и разработка технологии ковшевой обработки сверхнизкоуглеродистых сталей с целью повышения качества поверхности автолистового проката» полностью удовлетворяет пункту 9 положения «О присуждении ученых степеней» ВАК Министерства образования и Науки РФ, а ее автор, Андрей Дмитриевич Хорошилов, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Я, Житенев Андрей Игоревич, даю согласие на включение своих личных данных в аттестационное дело Хорошилова А.Д.

Официальный оппонент

Кандидат технических наук, ведущий инженер научно-технологического комплекса «Новые технологии и материалы», ФГАОУ ВО СПбПУ, г. Санкт-Петербург

Житенев Андрей Игоревич

С-Пб, ул. Политехническая, 29

Тел.: +79095832986

Эл. почта: zhitenev.ai1991@gmail.com

Подпись А.И. Житенева удостоверяю

